

МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ С ОТКЛЮЧЕНИЕМ УСИЛЕНИЯ

Представлены результаты разработки и изготовления СВЧ-модуля, выполняющего функции малошумящего усилителя с отключением усиления в диапазоне рабочих частот 1,0–4,0 ГГц. В состав модуля входят МИС дискретно-управляемого переключателя, драйвера управления и малошумящего усилителя. Получены СВЧ-характеристики и параметры изделия, подтверждающие возможность использования данных модулей в разработке и изготовлении элементов приемо-передающих модулей АФАР.

ВВЕДЕНИЕ

Современные ППМ антенных фазированных решеток широко используют в своем составе монолитные интегральные схемы СВЧ [1, 2]. Для реализации некоторых режимов работы АФАР малошумящий усилитель (МШУ) на входе приемного канала необходимо выключать, но так как процесс включения/выключения не должен превышать 100 нс, использование выключения напряжения питания МШУ в данном случае не подходит вследствие возникающих переходных процессов. В подобных случаях свое применение находит МШУ с отключением усиления.

В статье представлены результаты разработки модуля СВЧ, в составе которого предусмотрены МИС дискретно-управляемого переключателя, драйвера управления и МШУ.

СОСТАВ МОДУЛЯ

Дискретно-управляемый переключатель типа SP2T (одно-полюсный переключатель на два канала) с управлением параллельным кодом в зависимости от управляющих напряжений обеспечивает коммутацию СВЧ-сигнала в один из двух каналов. Для поддержки совместимости управления переключением с контроллерами управления, традиционно реализованными по кремниевой технологии на основе КМОП- или ТТЛ-логики, в состав модуля включен драйвер, обеспечивающий преобразование входного положительного напряжения 0/+5 В в два выходных управляющих напряжения, используемых переключателем.

Базовым активным элементом созданных СВЧ МИС является полевой транзистор с барьером Шоттки, изготовленный по технологии GaAs рНЕМТ 0,25 мкм, разработанной на предприятии ЗАО «НПП «Планета-Аргалл» [3]. Переключатель реализован на ключевых транзисторах: в цепи «вход/выход» использованы транзисторы с шириной затвора 600 и 300 мкм. Применение дополнительных каскадов транзисторов с шириной затвора 150 мкм в цепи «вход/выход-«земля» позволяет дополнительно улучшить развязку между каналами, при этом отключенный выход нагружается на сопротивление 50 Ом для обеспечения приемлемых значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

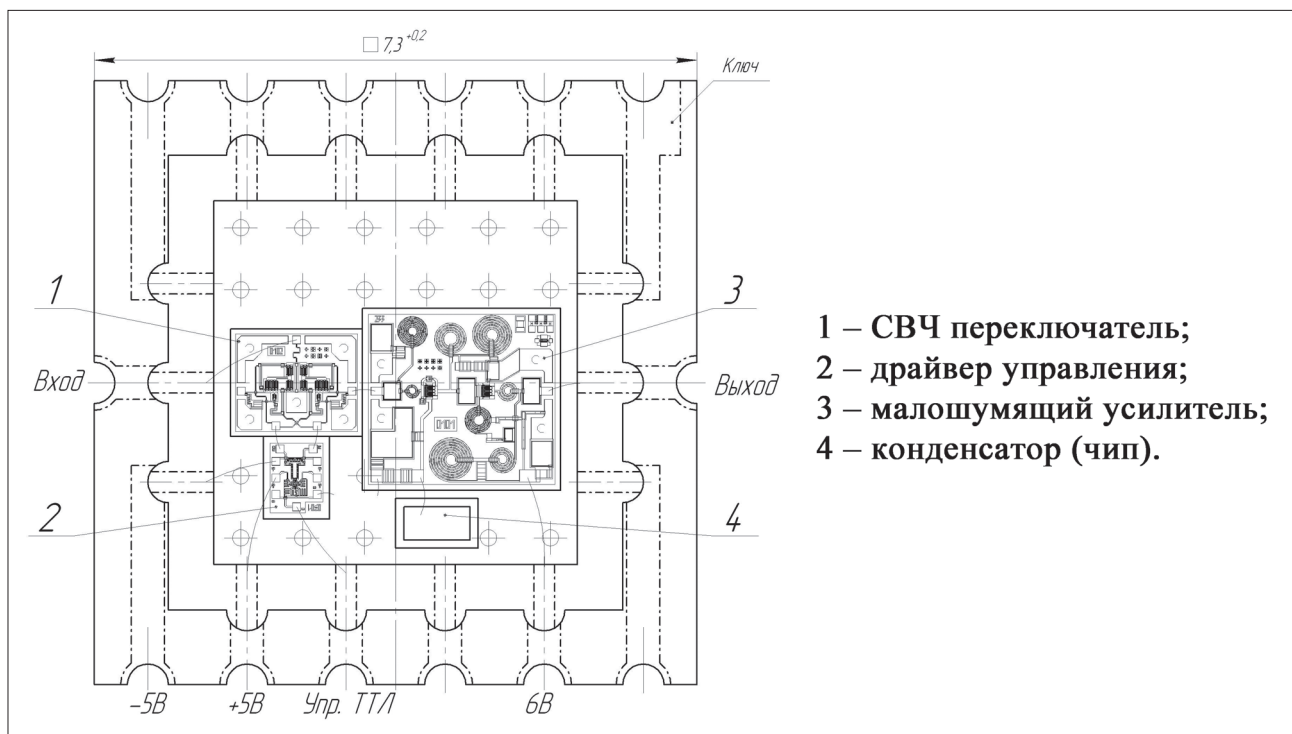
Типовые напряжения отсечки транзисторов рНЕМТ в составе переключателя составляют от –1,6 до –1,2 В, при этом достигается компромисс между начальным током стока транзистора, а соответственно, сопротивлением открытого канала транзистора и величиной пробивных напряжений затвор-сток и затвор-исток.

Выбор конструкции ключевого транзистора обеспечивает минимальные резистивные потери на проход СВЧ-сигнала в области сток-исток транзистора и достаточное напряжение

пробоя для гарантированного безопасного переключения выходными управляющими напряжениями драйвера. Рабочая полоса частот СВЧ-переключателя достигает 0,01–20 ГГц.

В составе драйвера управления имеются ключевые транзисторы с шириной затвора 20 мкм, на основе которых реализуются инверторы, обеспечивающие формирование прямого и инверсного напряжений, а также транзисторы с шириной затвора 10 мкм в диодном включении, формирующие цепи сдвига уровня выходных напряжений инвертора. Величина уровней выходных напряжений драйвера существенно зависит от напряжений отсечки транзисторов, используемых в его составе. Напряжение отсечки ($-0,8 \pm 0,1$) В оптимально с точки зрения получения минимального разброса величины выходных напряжений по двум каналам управления. Тем не менее технологический разброс не позволяет обеспечить требуемую точность в достижении параметров транзистора и реальное напряжение отсечки изменяется в более широких пределах, от –1,2 до –0,6 В. В результате драйвер управления преобразует входное напряжение уровня ТТЛ (0/+5) В в пару выходных напряжений двух уровней: «нуля» ($-0,2 \dots +0,4$) В и «единицы» (от –1,6 до –3) В. Формируемые уровни выходных напряжений драйвера управления достаточны для управления режимами работы транзисторов переключателя. Драйвер управления использует двуполярное питание +5 и –5 В. Токи потребления по каждому из источников питания не превышают 2–3 мА и схемотехнически зависят от величины тока, обеспечиваемого стабилизаторами тока (транзистор с соединенными затвором и истоком, ширина затвора 8 мкм), установленными в цепях питания. Аналогичный подход реализован и в схемотехнике входной цепи управления. Поскольку используемые транзисторы являются нормально открытыми и требуют для управления (закрытия) отрицательного смещения, на затворе во входной цепи предусмотрена диодная цепочка для сдвига положительного (+5 В) напряжения управления. Резисторы, входящие в состав драйвера управления, выполняют несколько функций:

- используемая система резисторов предназначена для обеспечения необходимого уровня выходных напряжений драйвера и токов потребления по цепям питания и во входной цепи управления;
- схемотехника с использованием резисторов позволяет в некоторой степени минимизировать влияние технологического разброса параметров активных элементов на параметры драйвера;
- наличие резисторов в цепях питания и управления обеспечивает ограничение тока в случае превышения напряжения питания (управления), что защищает от выгорания диодные элементы вследствие превышения предельно допустимого тока через эти элементы.



▲ Рис. 1. Внешний вид модуля СВЧ

МШУ выполнен по двухкаскадной схеме на транзисторах с шириной затвора 600 мкм и с последовательным однополярным питанием +6 В. Рабочая полоса частот МШУ составляет 1,0–4,0 ГГц. Для улучшения характеристик в нижней части рабочего диапазона частот, в первую очередь КСВН входа, в состав конструкции транзистора входного каскада включены две емкости металл-окисел-металл номиналом порядка 0,2 пФ, включенные параллельно внутренней емкости сток-исток транзистора, что в некоторой степени имитирует величину емкости сток-исток транзистора с большей шириной затвора и упрощает согласование на минимум КСВН входа на частоте 1,0 ГГц.

Описанные выше кристаллы переключателя, драйвер управления и МШУ смонтированы на металлокерамическое основание. Внешний вид модуля (без крышки) представлен на рис. 1. Конструкция основания позволяет использовать его для поверхностного монтажа. Разработанный модуль можно задействовать в составе ППМ для коммутации приемного канала в режим приема (подключение МШУ ко входу антенны) или передачи (переключение входа МШУ от антенны на нагруз-

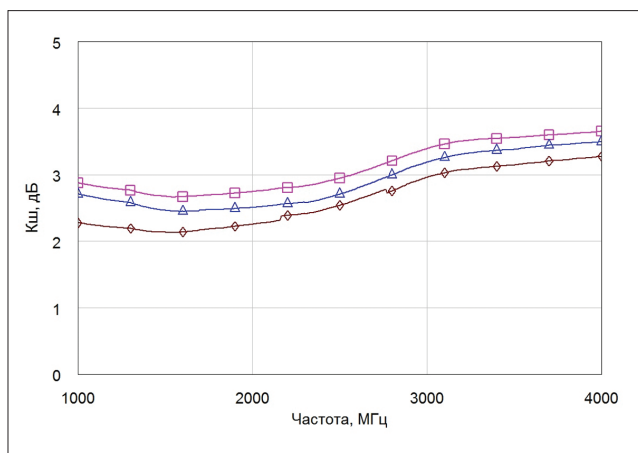
ку 50 Ом) и тем самым защиты чувствительного входа МШУ от влияния сигнала высокого уровня во время работы ППМ на передачу. Динамический диапазон переключения не менее 50 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

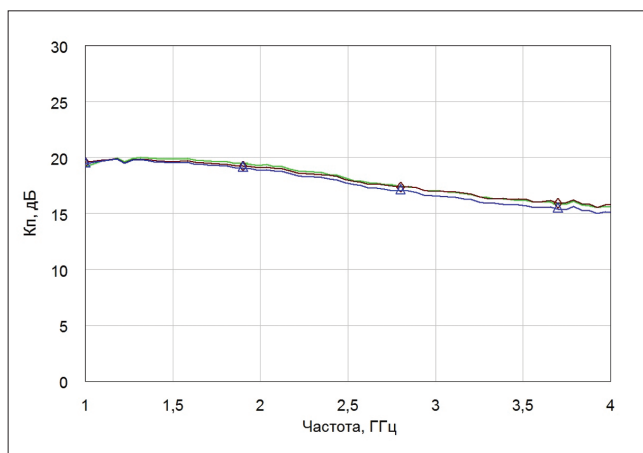
На рис. 2–6 представлены измеренные характеристики, полученные на экспериментальных образцах.

Коэффициент шума модуля (рис. 2) представляет собой сумму прямых потерь в переключателе и коэффициента шума МШУ (измеренные по отдельности в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом). При этом характер зависимости в частотной полосе в значительной степени определяется именно коэффициентом шума МШУ, в то время как переключатель вносит суммарную добавку на уровне 0,7–1,2 дБ в зависимости от конкретного образца.

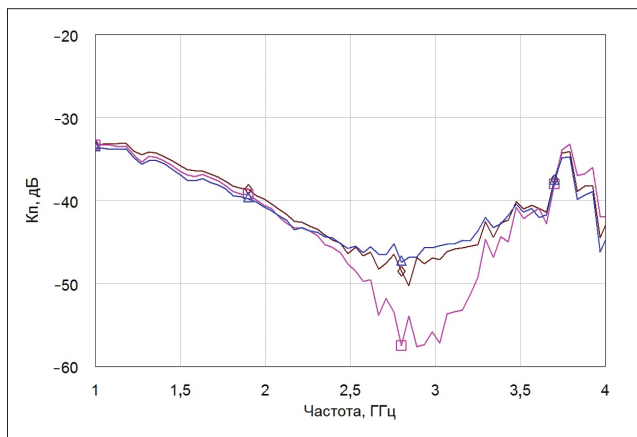
Коэффициент передачи модуля K_p в режиме с отключенным входом МШУ (рис. 4) определяется суммой коэффициента передачи МШУ (рис. 3) и развязки между каналами переключателя, поскольку в таком режиме работы фактически происходит



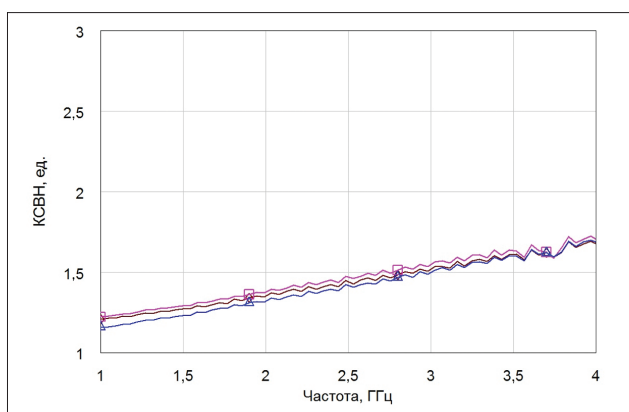
▲ Рис. 2. Зависимость коэффициента шума $K_{ш}$ модуля от частоты в режиме с подключенным входом МШУ



▲ Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи K_p модуля от частоты в режиме с подключенным входом МШУ



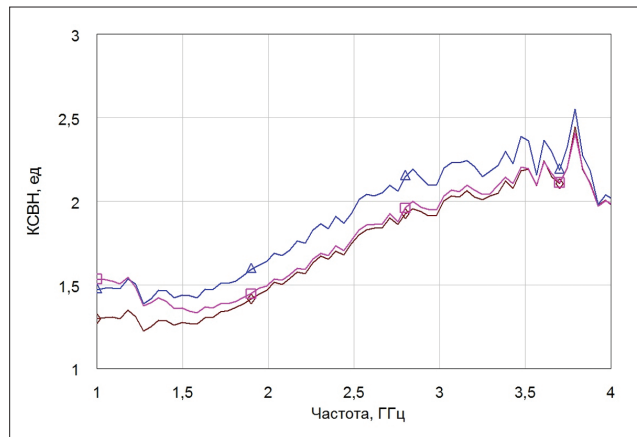
▲ **Рис. 4.** Зависимость коэффициента передачи K_p модуля от частоты в режиме с отключенным входом МШУ



▲ **Рис. 6.** Зависимость КСВН входа модуля от частоты в режиме с отключенным входом МШУ

усиление сигнала, прошедшего со входа переключателя на выход его закрытого канала.

КСВН входа модуля в режиме с подключенным входом МШУ (рис. 5) не превышает 2,5 в полосе частот 1,0–4,0 ГГц, однако значение не более 2,0 наблюдается в полосе частот 1,0–2,5 ГГц.



▲ **Рис. 5.** Зависимость КСВН входа модуля от частоты в режиме с подключенным входом МШУ

КСВН входа модуля в режиме с отключенным входом МШУ (рис. 6) представляет собой КСВН переключателя, нагруженного по выходу на тонкопленочный резистор с номиналом сопротивления 50 Ом. По результатам измерений, представленным на рис. 2–6, видно, что наилучшие характеристики модули демонстрируют в полосе частот 1,0–2,5 ГГц, которую следует считать предпочтительной для их использования.

Все элементы разработанного модуля (кристаллы МИС и металлокерамическое основание) изготовлены на отечественном предприятии и, соответственно, могут быть использованы разработчиками для решения вопросов, связанных с импортозамещением зарубежных комплектующих. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ. Технологическая основа АФАР//Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 7.
2. Павлов С., Филиппов А. Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей//Компоненты и технологии. 2014. № 7.
3. Козловский Э. Ю., Осипов А. М., Селезнев Б. И. СВЧ МИС МШУ на основе наногетероструктур GaAs pHEMT//Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1, 2.